

# بررسی جنبش نیرومند زمین و داده های شتابنگاری در زمین لرزه ۲۰ اردیبهشت

## ۱۳۷۶ اردکول (قائن) با بزرگای $M_w=7.2$

مهدی زارع، استادیار پژوهشکده زلزله شناسی پژوهشگاه

### ۱- چکیده

زمین لرزه ۲۰ اردیبهشت ۱۳۷۶ (۱۰ مه ۱۹۹۷) اردکول با بزرگای  $M_w=7.2$ ،  $(NEIC, M_s=7.3, mb=6.4)$  و گسیختگی گسل زمین لرزه سطحی با طول بیش از ۸۰ کیلومتر گزارش گردید. این زلزله به ثبت داده های شتابنگاری در ۲۸ ایستگاه در خاور کشور منجر شد. در این مقاله داده های مربوط به ۱۳ ایستگاه که لرزه اصلی در آنها نگاشته شده و یک ایستگاه که پس لرزه در آن ثبت شده، مطالعه شده است. به منظور بررسی داده های شتابنگاری، ابتدا این داده ها (با برآورد نسبت طیفی سیگنال به نوفه) پردازش و سپس با توجه به ویژگیهای بیشینه جنبش (شتاب) و محتوای فرکانسی (بر اساس طیف فوریه شتاب چشمه)، کاهندگی جنبش زمین در این زلزله بررسی شده است. رده بندی ساختگاه بر اساس طیفهای تشدید  $H/V$  و برآورد بزرگای  $M_w$  برای داده های با بهترین کیفیت انجام شده است. این مطالعه نشان داد که توزیع بیشینه شتاب در زلزله مذکور از مدل کاهندگی بیشینه شتاب در ایران پیروی کرده است. علاوه بر آن، کاهندگی فرکانس گوشه ( $f_c$ ) و فرکانس بیشینه ( $f_{max}$ ) با فاصله رومرکزی نیز بررسی و نشان داده شده است. لازم به یادآوری است که با توجه به عدم ثبت داده ها در نزدیکی از فاصله کانونی ۶۸ کیلومتر، بیشینه شتاب در این زلزله ۱۱۸ سانتیمتر بر مجذور ثانیه مربوط به یکی از مؤلفه های افقی نگاشته شده در سنگان، در فاصله کانونی یاد شده بوده است.

کلید واژه ها: زمین لرزه ۱۳۷۶ اردکول- قائن، اثر ساختگاه، پردازش، داده های شتابنگاری، کاهندگی، فرکانس بیشینه،

فرکانس گوشه، نسبت سیگنال به نوفه.

### ۲- مقدمه

زمین لرزه ۲۰ اردیبهشت ۱۳۷۶ با  $M_w=7.2$ ، و سازوکار ژرفی راستالغز بخش وسیع و کم جمعیتی در خاور شهرهای قائن و بیرجند را به لرزه در آورد. با توجه به سازوکار و روند گسل اردکول، مؤلفه راستالغز راستگرد برای گسل زمین لرزه ای اردکول مسلم می باشد [۱]. زلزله اردکول- قائن طبق گزارشهای رسمی خبرگزاری ایرنا با ۱۶۱۳ کشته و ۳۷۱۲ مجروح و حدود ۴۰,۰۰۰ نفر بی خانمان همراه بود [۲]. در این زلزله روستاهای زیادی در منطقه اردکول، آبیژ، حاجی آباد و کریزان در خاور شهرهای بیرجند و قائن تخریب گردید. این ناحیه محل وقوع زمین لرزه های مکرر در طی ۵۰ سال گذشته بوده است. زمین لرزه های دشت بیاض (۱۹۶۸/۸/۳۱)،  $(M_s=7.4)$ ، وندیک (شمال قائن، ۱۹۷۶/۱۱/۷)،  $(M_s=6.4)$ ، مژن آباد (جنوب خواف، ۱۹۷۹/۱۱/۱۶)،  $(M_s=6.8)$ ، کریزان- خواف (۱۹۷۹/۱۱/۱۴)،  $(M_s=6.6)$  و کولی- بنیاباد (۱۹۷۹/۱۱/۲۷)،  $(M_s=7.1)$  با گسیختگی های سطحی زمین لرزه ای و خسارتهای مهم جانی و مالی در این ناحیه رخ داده اند (جدول ۱). زلزله اردکول به خرابی ۸۰ روستا در منطقه حاجی آباد (زیرکوه) شهرستان قائن و بخش درمیان شهرستان بیرجند منجر شد؛ ولی به دلیل جمعیت بسیار کم منطقه مذکور، خسارتهای جانی و مالی، بسیار محدودتر از خسارتهای محتمل بر اثر چنین زلزله ای در یک منطقه پر جمعیت بود.

جدول (۲): داده های شتابنگاری مربوط به ۱۳ ایستگاه که در آنها لرزه اصلی زلزله اردکول ثبت شده و یک ایستگاه (حاجی آباد) ثبت کننده یک پس لرزه مهم این زلزله. عدم برآورد  $M_w$  و  $M_0$  مربوط به مطلوب نبودن نسبت  $S/N$  در محدوده فرکانسی مربوط است.

سطح حداکثر طیف فوریه شتاب ( $A_0$ ) (مشتاب بر ثانیه)	فاصله ( $R_0$ ) (کیلومتر)	فاصله کانونی ( $R_0$ ) (کیلومتر)	بیشینه شتاب (مشتاب بر محور ثانیه) ( $M_{sp}$ )	بزرگی گشتوری ( $M_w$ )	فرکانس کاری ( $f_c$ )	فرکانس بیشینه کاری ( $f_{max}$ )	فرکانس پایین گذر LP(Hz)	فیلتر بالا گذر HP(Hz)	نسبت بیشینه به نوبه سیگنال	بیشینه نوبه سیگنال (ثابته)	پهنای سیگنال (ثابته)	پهنای سیگنال (ثابته)	محدوده فرکانس بنیادی خاک $f_0$ (Hz)	طبقه بندی زده خاک	تعداد نگاشتها	مختصات ایستگاه شتابنگاری (درجه)	ایستگاه	شماره شتابنگاشت (BHRC)	ردیف	طول	
																				عرض شمالی	عرض خاوری
۴۰	۱۰۲	۸۸	۳۵	۳۷	۰/۱۶	۰/۱۷	۲۲	۰/۱۶۵	۲۰	۶۷-۷۰	۰-۶۵	۱-۸ (<۳)	۱	۴	۳۳/۸۳	۵۹/۲۵	پروچند	۱۷۳۷-۰۰۰	۱		
-	۱۲۰	-	۲۳	۱۰	۱۳	-	۲۰	۰/۹	۷	۵۷-۶۰	۰-۵۰	۴-۱۰ (<۳)	۱	۲	۳۳/۰۳	۵۸/۷۵	بگ آباد	۱۷۳۹-۰۰۰	۲		
-	۱۲۰	-	۱۹	۱۳	۱۷	-	۲۰	۱	۱۰	۷۰-۸۰	۰-۷۰	۵-۱۰ (>۳)	۲	۳	۳۳/۰۵	۵۸/۸۱	دشت بیاض	۱۷۴۰-۰۰۰	۳		
۱۵	۱۵۷	۱۵۲	۲۷	۲۸	۲۸	۰/۱۵	۲۸	۰/۱	۶۰۰	۰-۴	۵-۴۵	۰-۱۰-۴ (>۲)	۴	۲	۳۵/۰۲	۵۸/۸۰	فیض آباد	۱۷۴۱-۰۰۰	۴		
۲۰	۱۵۱	۱۲۰	۲۷	۲۶	۲۶	۰/۱۸	۳۰	۱	۱۲۰	۸۵-۹۰	۰-۸۰	۰/۸-۲ (>۴)	۴	۵	۳۳/۳۸	۵۸/۷۳	گناباد	۱۷۴۲-۰۰۰	۵		
-	۲۱۴	-	۵۲	۱۸	۴۰	-	۱۸	۱	۱۵	۲۷-۲۹	۰-۲۵	۰/۳-۰/۵ (>۳)	۴	۲	۳۵/۲۸	۵۹/۲۲	تربت حیدریه	۱۷۵۸-۰۰۰	۶		
۱۵	۱۸۶	۱۶۸	۴۵	۳۷	۷/۳	۱/۰	۱۸	۲	۱۷	۷۹-۸۱	۰-۷۸	۳-۸ (<۳)	۱	۲	۳۵/۰۸	۵۹/۵۲	سد شهید یعقوبی	۱۷۷۱-۰۰۰	۷		
۳۰	۶۶	۶۸	۱۱۲	۱۱۸	۷/۱	۱/۵	۴۰	۰/۹	۳۵	۸۰-۸۳	۰-۸۰	۱/۵-۱۰ (<۳)	۱	۲	۳۳/۴۳	۶۰/۲۲	سنگان	۱۷۵۴-۰۰۰	۸		
-	۲۸۶	-	۲۷	۱۴	۴۲	-	۲۲	۱/۵	۸	۵۲-۵۷	۰-۵۰	۲-۶ (>۳)	۳	۷	۳۵/۵۵	۵۸/۵۵	روش	۱۷۵۲-۰۳	۹		
۱۵	۱۰۶	۹۶	۱۸	۱۱	۱۷	۷/۳	۱۲	۱	۱۰	۷۰-۷۲	۰-۷۰	۶-۸ (<۳)	۱	۱	۳۳/۳۰	۵۸/۹۳	موسویه	۱۷۷۰-۰۰۰	۱۰		
۱۲	۱۱۰	۹۶	۱۸	۱۶	۱۸	۷/۳	۲۰	۱/۵	۱۱	۴۸-۵۰	۰-۵۰	۱-۱۱ (<۳)	۱	۱	۳۳/۷۵	۵۹/۵۲	مود	۱۷۵۱-۰۰۰	۱۱		
۱۰	۸۳	۸۸	۴۰	۲۰	۴۴	۷/۲	۲۲	۱	۲۰	۵۵-۶۰	۰-۵۵	۳-۶ (>۳)	۳	۲	۳۳/۹۵	۵۹/۴۸	مرک	۱۷۵۰-۰۰۲	۱۲		
۲/۵	۱۳	۸	۵۸	۱۵	۴۵	۴/۸	۴۰	۶	۹	۱۴-۱۵	۰-۱۴	۱۵-۲۰ (>۳)	۱	۳۹	۳۳/۶۵	۶۰/۰۲	حاجی آباد	۱۷۵۶-۰۰۱	۱۳		
۷۰	۷۸	۷۳	۹۲	۵۲	۱۰۲	۷/۳	۲۰	۱/۷	۵	۵۲-۵۵	۰-۵۵	۵-۱۰ (>۳)	۲	۷	۳۳/۵۹	۶۰/۱۲	خواف	۱۷۵۹-۰۰۰	۱۴		

در مقاله حاضر ابتدا داده های انتخابی با کیفیت خوب (نسبت سیگنال به نوفه در آنها در حد مناسب) معرفی شده اند. سپس، ضمن برآورد بزرگای  $M_w$  بر اساس داده های حاصله (توضیح در مرجع ۳)، با بررسی محتوای فرکانسی جنبش و پارامترهای فرکانس گوشه و فرکانس بیشینه، به بررسی کاهندگی این پارامترها با فاصله کانونی از چشمه پرداخته شده است. مسأله کاهندگی جنبش زمین در زمین لرزه اردکول بر اساس مقدارهای تصحیح شده بیشینه شتاب با مدل توسعه داده شده توسط نگارنده [۴] برای ایران و دو مدل کاهندگی ارائه شده برای اروپا و ایالات متحده مقایسه شده است.

### ۳- پردازش داده های شتابنگاری

داده های شتابنگاری زلزله ۱۳۷۶ اردکول با  $M_w=7.2$  (شکل ۱) در ایستگاههای شتابنگاری بیرجند، بسک آباد، گناباد، دشت بیاض، فیض آباد، سد شهید یعقوبی، تربت حیدریه، سنگان، خواف، ریوش، موسویه، مود، مرک، رشتخوار، بجستان، بردسکن، خوسف، محمدآباد (زابل)، مشهد (در استانداری و مرکز ساخت آزما)، نیشابور، سرایان، قاسم آباد، کرمان، باغستان، جنگل، فتح آباد و سده ثبت گردید. از این میان، نگاشتهای حاصله در سده، خواف، رشتخوار، بجستان و جنگل از نوع آنالوگ (ثبت شده با شتابنگاری SMA-1) و نگاشتهای حاصله در سایر ایستگاهها از نوع رقمی (ثبت شده با شتابنگاری SSA-2) بوده است. متأسفانه به دلیل خرابی محل اتاقکی که دستگاه شتابنگاری در روستای حاجی آباد در آن واقع بود، نگاشت لرزه اصلی در حداقل فاصله ممکن به دست نیامد؛ لذا، در این تحقیق یک نگاشت مربوط به پس لرزه ۱۳۷۶/۲/۲۰ در این ایستگاه بررسی گردید. از سوی دیگر، از آنجا که بسته به دور یا نزدیک بودن به کانون زمین لرزه و میزان نوفه های موجود در نگاشت، کیفیت نگاشتها با هم متفاوت بوده است، نگاشتهای مربوط به ۱۴ ایستگاه اول از میان ایستگاههای ذکر شده که کیفیت مناسبی داشته اند و نسبت سیگنال به نوفه در آنها بیش از سه بوده است، انتخاب و در این مطالعه بررسی گردیده اند (جدول ۲).

به منظور مطالعه داده های شتابنگاری، ابتدا برای کلیه نگاشتهای حاصله نسبت سیگنال به نوفه  $(S/N)$  محاسبه گردید. روند کامل محاسبه این نسبت برای پردازش داده های مربوط به زلزله ۱۳۷۵ گلستان اردبیل، توسط نگارنده در مرجع [۳] توضیح داده شده است.

به منظور پردازش داده ها، در ابتدا، خط مبنا در مورد هر نگاشت تصحیح شده است. سپس به منظور محاسبه نسبت سیگنال به نوفه در مورد هر نگاشت، طیف دامنه فوریه شتاب مربوط به پنجره سیگنال  $S(f)$  و طیف دامنه فوریه پنجره نوفه  $N(f)$  محاسبه و پس از تقسیم هر یک بر ریشه دوم طول زمانی مربوط به هر پنجره انتخابی، بر هم تقسیم شده اند. نسبت سیگنال به نوفه  $(R_{sn})$  را می توان با رابطه (۱) نشان داد:

$$R_{sn} = \frac{\frac{S(f)}{\sqrt{t_s}}}{\frac{N(f)}{\sqrt{t_n}}} \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $t_s$  زمان مربوط به پنجره سیگنال و  $t_n$  زمان مربوط به پنجره نوفه می باشد. این کار پس از صاف کردن (*Smoothing*) طیفهای فوریه با استفاده از تابع صاف کردن [۵] انجام شده است که در آن دامنه های صحیح را (هنگامی که نسبت سیگنال به نوفه از حد آستانه مشخصی، مثلاً ۳، بیشتر است) در تمام فرکانس ها شامل شده است. هنگامی که حد آستانه برای نسبت سیگنال به نوفه برابر سه در نظر گرفته شود، حد فرکانسی که دامنه طیف  $R_{sn}$  از این حد بالاتر رود، به عنوان فرکانس فیلتر گذر بالا و حدی که دامنه طیف یاد شده از این حد کمتر شود، به عنوان فرکانس فیلتر گذر پایین انتخاب می شود به نحوی که:

$$V_f \in [f_{HP}, f_{LP}], R_{sn}(f) \geq 3 \quad (2)$$

میزان صاف شدن در مطالعه حاضر ۰/۴ در نظر گرفته شده است. پنجره های زمانی سیگنال و نوفه برای نگاشتهای مختلف انتخاب شده و در جدول (۲) آمده است.

بر اساس برآورد نسبت سیگنال به نوفه، نگاشتهای مربوط به بیرجند، بسک آباد، دشت بیاض، فیض آباد، گناباد،

جدول (۱): زمین لرزه های مهم تاریخی و سده بیستم در پیرامون پهنه زلزله زده اردکول - قائن (در محدوده مختصات ۵۰°/۳۲ تا ۵۰°/۳۴ عرض شمالی و ۵۹°/۰۰ تا ۶۱°/۰۰ طول خاوری) به همراه پس لرزه های مهم زلزله اردکول (روی داده در روز ۱۰/۵/۱۹۹۷)

شماره	تاریخ	زمان وقوع	مختصات شمالی	عرض شمالی طول خاوری	مختصات رومرکز	FD (کیلومتر)	Mb	Ms	Mw	ML	Efa*	مرجع	پهنه رومرکزی
۱	۷۶۳		۳۲/۳۰۰	۵۹/۳۰۰				۷/۶				Amb	خراسان
۲	۱۰۶۶/۰۵۰۰		۳۲/۹۰۰	۵۹/۲۰۰				۶/۵				Amb	
۳	۱۴۹۳/۰۱۱۰	۰۶	۳۲/۰۰۰	۵۹/۸۰۰				۷/۰			*	Amb	مؤمن آباد
۴	۱۵۴۹/۰۲۱۵	۲۴	۳۲/۷۰۰	۶۰/۰۰۰				۶/۷				Amb	شرق قائن
۵	۱۹۳۶/۰۶۳۰	۱۹:۲۶:۶۰	۳۲/۶۷۰	۶۰/۴۵۰		۱۰	۶/۲	۶/۰				Amb	
۶	۱۹۴۶/۰۲۱۰	۱۳:۱۲:۲۵	۳۲/۵۵۰	۵۹/۲۶۰		۳۳	۵/۵					BER	گیو
۷	۱۹۴۶/۰۲/۱۲		۳۲/۶۰۰	۵۹/۸۰۰			۴/۵					B.ZA	سریشنه
۸	۱۹۵۰/۰۹/۲۴	۲۲:۵۶:۴۰	۳۲/۵۰۰	۶۰/۷۰۰				۵/۹				NAB	
۹	۱۹۶۸/۰۸/۳۱	۱۰:۴۷:۳۰	۳۲/۰۴۰	۵۹/۰۶۰		۱۳	۶/۰	۷/۴			*	Amb	دشت بیاض
۱۰	۱۹۷۶/۱۱/۰۷	۰۴:۰۰:۵۰	۳۲/۸۶۰	۵۹/۲۳۰		۱۳	۵/۸	۶/۴				Amb	وندیک (قائن)
۱۱	۱۹۷۹/۰۱/۱۶	۰۹:۵۰:۱۰	۳۲/۸۹۷	۵۹/۴۷۲		۳۳	۶/۰	۶/۸				Amb	مژن آباد
۱۲	۱۹۷۹/۱۱/۱۴	۰۲:۲۱:۲۰	۳۲/۹۱۸	۵۹/۷۴۱		۳۳	۶/۰	۶/۶			*	Amb	کرپزان - حواف
۱۳	۱۹۷۹/۱۱/۲۷	۱۷:۱۰:۳۰	۳۲/۹۶۲	۵۹/۸۱۷		۱۰	۶/۱	۷/۱			*	Amb	کولی - بنیباد
۱۴	۱۹۷۹/۱۲/۰۷	۰۹:۲۴	۳۲/۰۳۳	۵۹/۸۱۷		۳۱	۵/۸				*	NEIC	
۱۵	۱۹۹۷/۰۵/۱۰	۰۷:۵۷:۲۹	۳۲/۸۳۰	۵۹/۸۱۰		۱۰	۶/۴	۷/۷	۷/۲			NEIC	اردکول - قائن
۱۶	۱۹۹۷/۰۵/۱۰	۰۸:۲۱:۴۹	۳۲/۸۵۰	۶۰/۴۱۰		۱۰	۳/۸					NEIC	
۱۷	۱۹۹۷/۰۵/۱۰	۰۸:۲۲:۴۷	۳۲/۰۸۰	۶۰/۱۷۰		۱۰	۴/۸					NEIC	
۱۸	۱۹۹۷/۰۵/۱۰	۰۸:۳۷:۱۴	۳۲/۸۸۰	۶۰/۳۱۰		۱۰	۴/۵					NEIC	
۱۹	۱۹۹۷/۰۵/۱۰	۱۰:۲۷:۱۰	۳۲/۷۳۰	۵۹/۹۵۰		۱۰	۵/۴					NEIC	

\* گسل زمین لرزه ای

تربت حیدریه، سد شهید یعقوبی، سنگال، ریوش، موسویه، مود، مرک، حاجی آباد (پس لرزه) و خواف (شکل ۱) که دارای نسبت سیگنال به نوفه بالا بوده اند، برای بررسی جنبش نیرومند زمین در این زلزله انتخاب شده و در جدول (۲) علاوه بر فیلترهای گذر بالا (HP) و گذر پایین (LP)، بیشینه نسبت سیگنال به نوفه برای این نگاشتها در این جدول آمده است. در شکلهای (۱-۲) تا (۲-۱۴)، الف تا ت)، به ترتیب شتابنگاشت اصلاح شده، نسبت سیگنال به نوفه، طیف فوریه شتابنگاشت اصلاح شده و نسبت  $H/V$  (برای برآورد اثرهای ساختگاه)، برای هر سه مؤلفه نگاشتها ارائه شده است.



شکل (۱): موقعیت منطقه مورد مطالعه، گسل زمین لرزه ای ۱۳۷۶ اردکول و محل ایستگاههای شتابنگاری که داده های آنها در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است.

#### ۴- برآورد اثرهای ساختگاه

به منظور برآورد اثرهای ساختگاه، از مقدار نسبت  $H/V$  برای محاسبه فرکانس بنیادی خاک محل استفاده شده است. این برآورد با توجه به مطالعه قبلی صورت گرفته برای ساختگاههای شتابنگاری در کشور [۶] و طبقه بندی اثرهای ساختگاه در چهار رده انجام شده است.

در این راستا، نسبت طیفی ( $R_{HV}$ ) مؤلفه افقی به مؤلفه قائم محاسبه شده است. غلبه دامنه های موجهای برشی بر روی مؤلفه های افقی بیشتر از دامنه های موجهای

فشاری ( $P$ ) است که بیشتر روی مؤلفه قائم غلبه دارند. این موجها در صورت ورود به محیطی با مشخصات فیزیکی متفاوت با پی سنگ (با سرعت موج برشی متفاوت)، دچار بیشترین تغییر محتوای فرکانسی و دامنه می شوند؛ لذا، استفاده از نسبت طیفی می تواند نمایانگر تابع تشدید در محل ساختگاه موردنظر باشد. برای محاسبه نسبت طیفی، میانگین طیف فوریه مؤلفه های افقی صاف شده شتاب بر طیف فوریه مؤلفه قائم صاف شده شتاب تقسیم می شود. اگر  $S_{HI}(f)$  و  $S_{H2}(f)$  طیفهای فوریه مربوط به مؤلفه های افقی شتاب و  $S_V(f)$  طیف فوریه مؤلفه قائم باشد و  $T_{H1}$ ،  $T_{H2}$  و  $T_V$  به ترتیب پنجره های زمانی برای مؤلفه های افقی و قائم یاد شده در نظر گرفته شود، نسبت طیفی برابر است با:

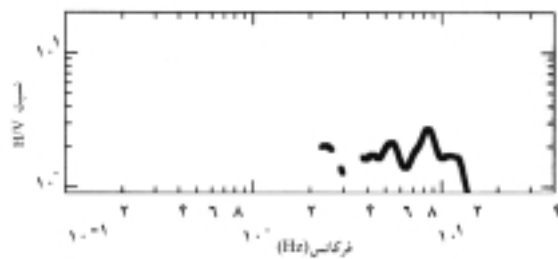
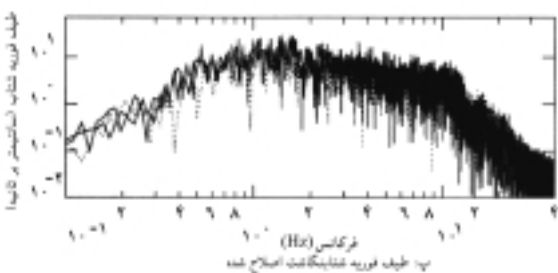
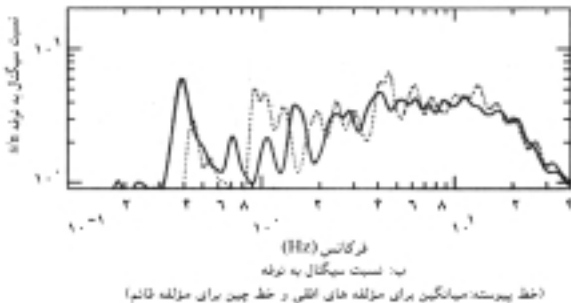
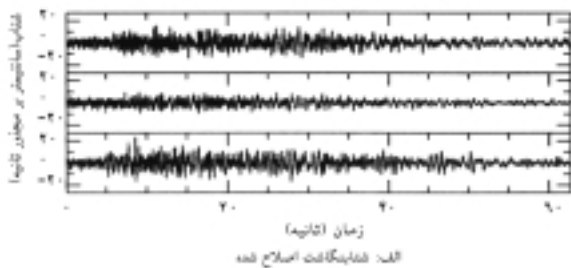
$$R_{HV} = \frac{\sqrt{\frac{S_{HI}(f)^2}{2\sqrt{T_{H1}}} + \frac{S_{H2}(f)^2}{2\sqrt{T_{H2}}}}}{\frac{S_V(f)}{T_V}} \quad (3)$$

زارع و همکاران [۶] نشان دادند که بهره گیری از نسبت طیفی مذکور برای نگاشتهای جنبش شدید زمین در ایران، با مقایسه نتایج بررسیهای مقاطع سرعت موج و مطالعات میکروترموورها می تواند نشانه خوبی برای طبقه بندی جنس زمین (خاک) ساختگاه باشد.

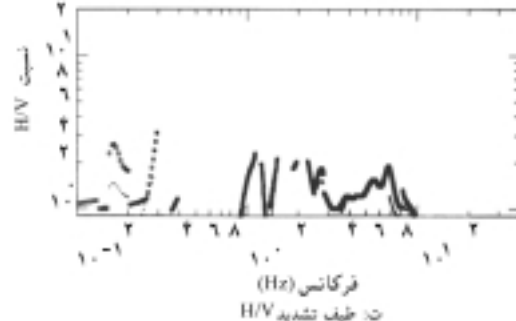
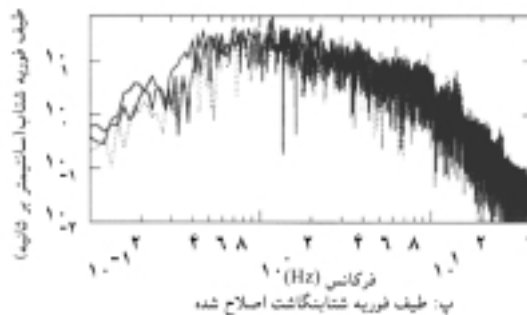
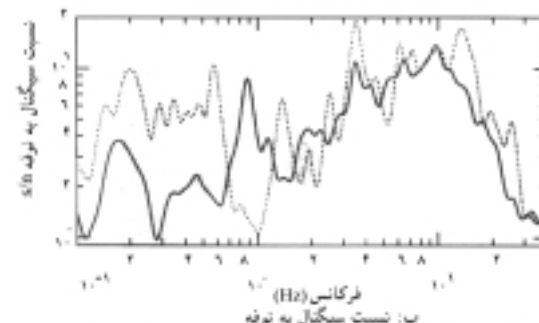
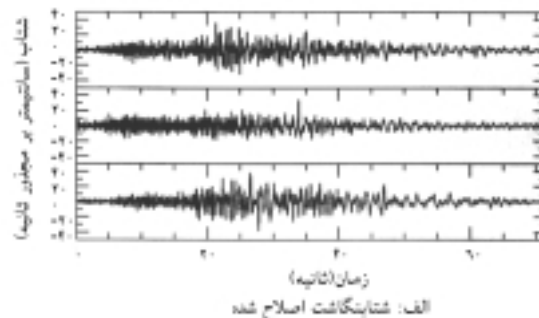
برآورد نسبت  $H/V$  بر اساس بخشهایی از نگاشتها انجام می شود که نسبت سیگنال به نوفه در آنها بیشتر از سه برابر باشد. بر اساس مطالعه یاد شده ساختگاههای سنگی (نوع اول)، آبرفت سخت (نوع دوم)، خاک غیرچسبنده ژرف (نوع سوم) و خاک نرم (نوع چهارم) به ترتیب با محدوده فرکانس بنیادی ساختگاه (روی طیف  $H/V$ ) با تشدید بیش از سه برابر در محدوده بیش از ۱۵ هرتز، بین ۵ و ۱۵ هرتز، بین ۲ و ۵ هرتز و کمتر از ۲ هرتز مشخص می شوند. علاوه بر آن، متوسط سرعت موج برشی در سی متر اول ضخامت خاک برای چهار نوع جنس خاک یاد شده به ترتیب بیش از ۷۰۰، بین ۵۰۰ و ۷۰۰، بین ۳۰۰ و ۵۰۰ و کمتر از ۳۰۰ متر بر ثانیه می باشد.

محاسبه نسبت  $H/V$  در ساختگاههایی که تعداد نگاشتهای به دست آمده در آنها زیاد بوده است، نشان می دهد که این نسبت، پایداری مناسبی نشان می دهد. به

عنوان مثال، در ساختگاه حاجی آباد که ۳۹ نگاشت در آن به دست آمده است، محدوده تشدید نسبت  $H/V$  به طور کلی در حد بین ۴ تا ۱۵ هرتز پایدار است (شکل ۳)؛ لذا همان گونه که در شکل (۲، ۱۳، ت) مشخص است، حد میانگین و میانگین بعلاوه انحراف معیار برای این نسبت در حد بین ۴ تا ۱۵ هرتز به صورت پایداری مشاهده می شود.



شکل (۲-۲): شتابنگاشت ثبت شده در بسک آباد



شکل (۲-۱): نگاشت ثبت شده در بیرجند

### ۵- کاهندگی جنبش نیرومند زمین

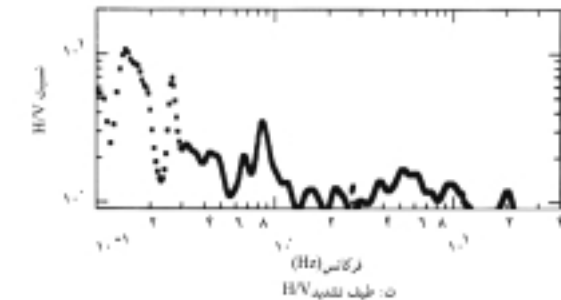
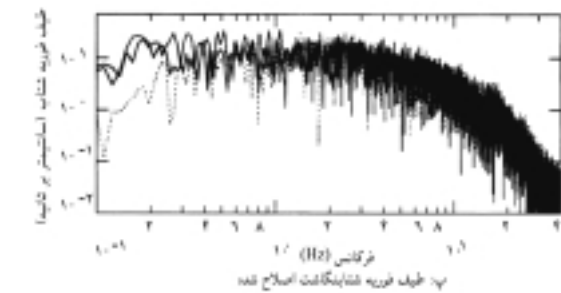
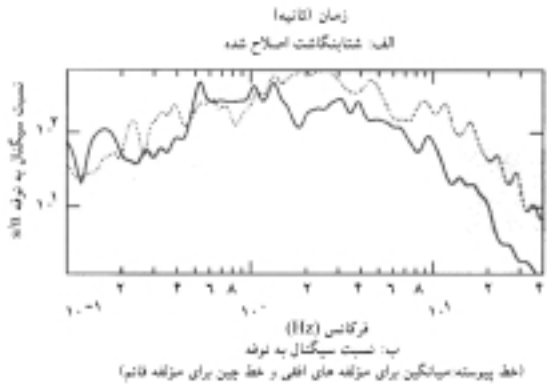
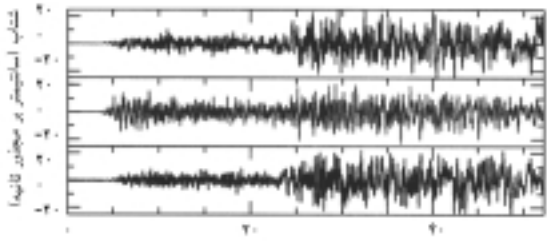
به منظور بررسی کاهندگی جنبش نیرومند زمین، پارامترهای بیشینه شتاب افقی و قائم در این زمین لرزه با مدل‌های توسعه داده شده قبلی برای ایران [۴] مقایسه شده اند. رابطه کاهندگی مورد استفاده برای ایران با استفاده از ضرایب ناحیه البرز- ایران مرکزی به صورت رابطه (۴) توسط نگارنده پیشنهاد شده است:

$$\log A = a.M + bX - \log X + ci Si + \sigma i.P \quad (4)$$

در رابطه (۴)،  $A$  بیشینه شتاب بر حسب متر بر مجذور

ثانیه،  $M$  بزرگای گشتاوری،  $X$  فاصله کانونی (به کیلومتر)،  $c_i$  ضریب ساختگاه (رده های ساختگاه،  $S$ ، از یک تا چهار) و  $\sigma$  انحراف معیار (با قرار دادن  $P=1$ ) می باشد (تعداد میانگین با  $P=0$  محاسبه می شود). ضرایب رابطه (۴) روی ساختگاه سنگی برای مؤلفه افقی در ناحیه البرز- ایران مرکزی به این ترتیب پیشنهاد شده است:

$$\begin{aligned} a &= 0.322 \\ b &= -0.0004 \\ c_1 &= -0.688 \\ \sigma &= 0.394 \end{aligned} \quad (5)$$

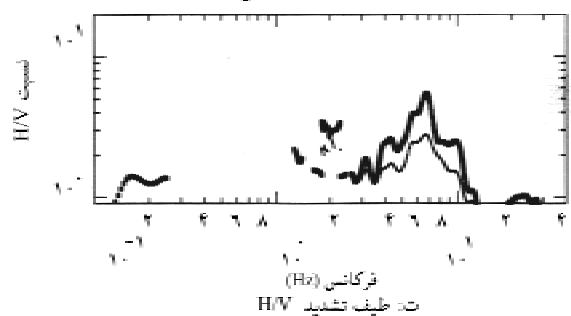
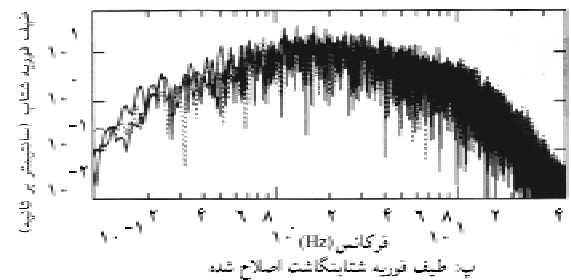
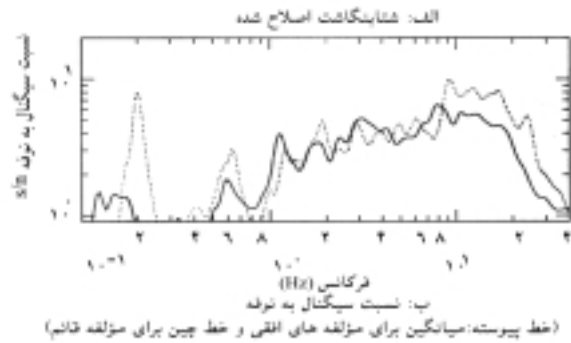
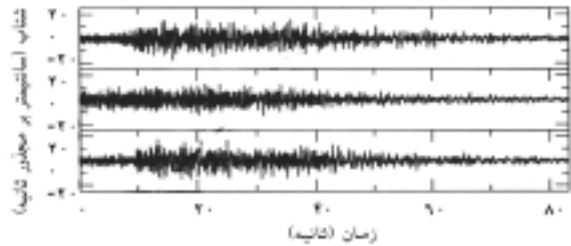


شکل (۲-۴): شتابنگاشت ثبت شده در فیض آباد

این ضرایب برای مؤلفه قائم در همان ناحیه (البرز- ایران مرکزی) روی ساختگاه سنگی چنین است:

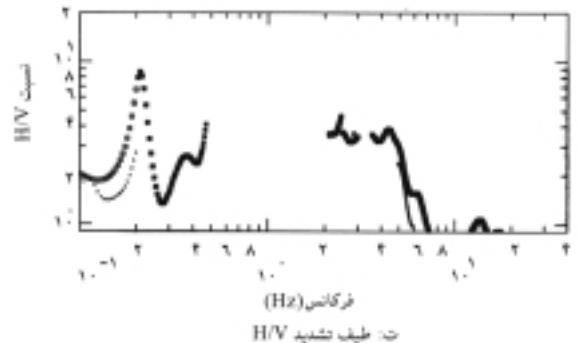
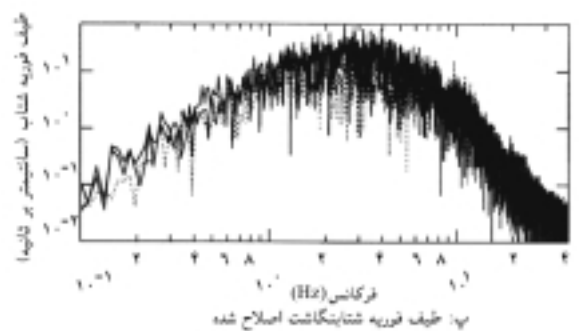
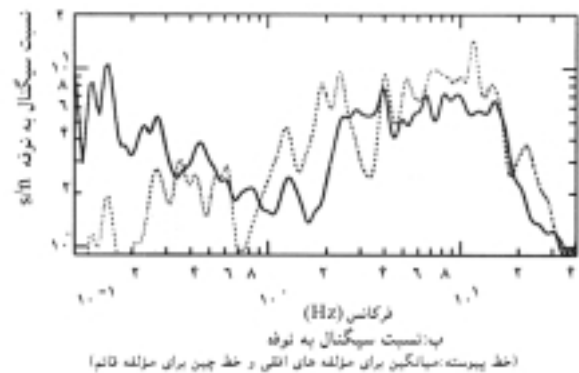
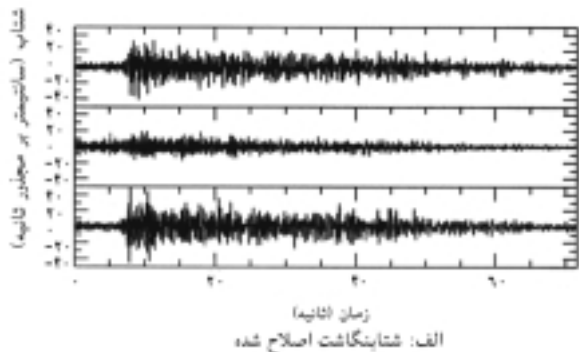
$$\begin{aligned} a &= 0.322 \\ b &= -0.0003 \\ c_1 &= -0.828 \\ \sigma &= 0.352 \end{aligned} \quad (6)$$

با در نظر گرفتن بزرگای  $M_w = 7.2$  زمین لرزه اردکول- قائن و برای فاصله های کانونی مختلف و با استفاده از ضرایب رابطه (۵) برای مؤلفه افقی، مقدارهای بیشینه شتاب



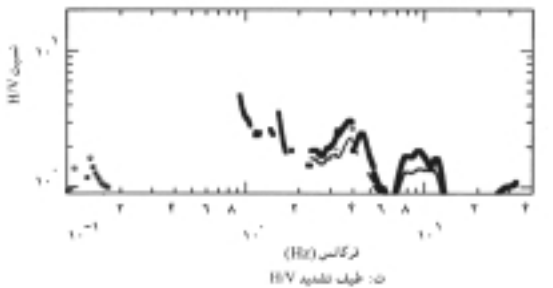
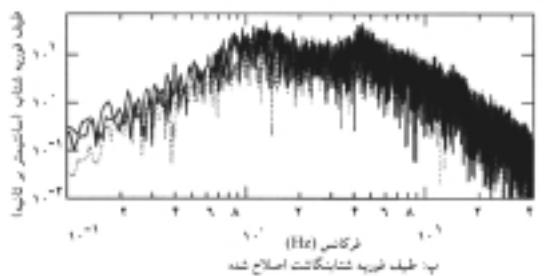
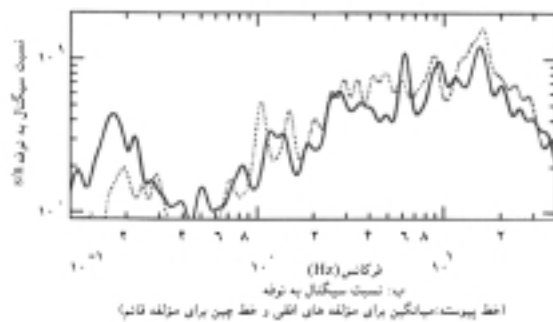
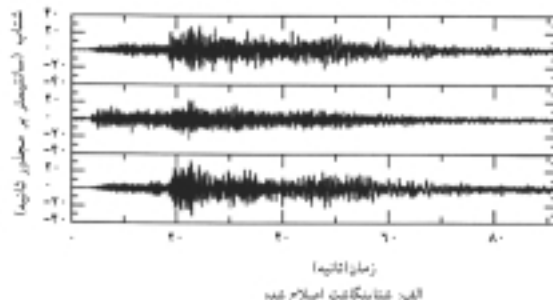
شکل (۲-۳): شتابنگاشت ثبت شده در دشت بیاض

برای حد میانگین و میانگین بعلاوه یک انحراف معیار با مقدارهای مشاهده شده بیشینه شتاب افقی (HPGA) بر حسب سانتیمتر بر مجذور ثانیه مطابق شکل (۴-۱) مقایسه شده است. داده‌های مشاهده شده انطباق نسبتاً مناسبی با مقدارهای برآورد شده با رابطه (۵) نشان می‌دهند. این مقایسه برای مقدارهای برآورد شده و مقایسه شده بیشینه شتاب قائم در شکل (۴-۲) به عمل آمده، که انطباق داده‌ها با مدل، نزدیک به وضعیت قابل مشاهده برای مؤلفه افقی می‌باشد.



شکل (۲-۴): شتابنگاشت ثبت شده در تریب حیدریه

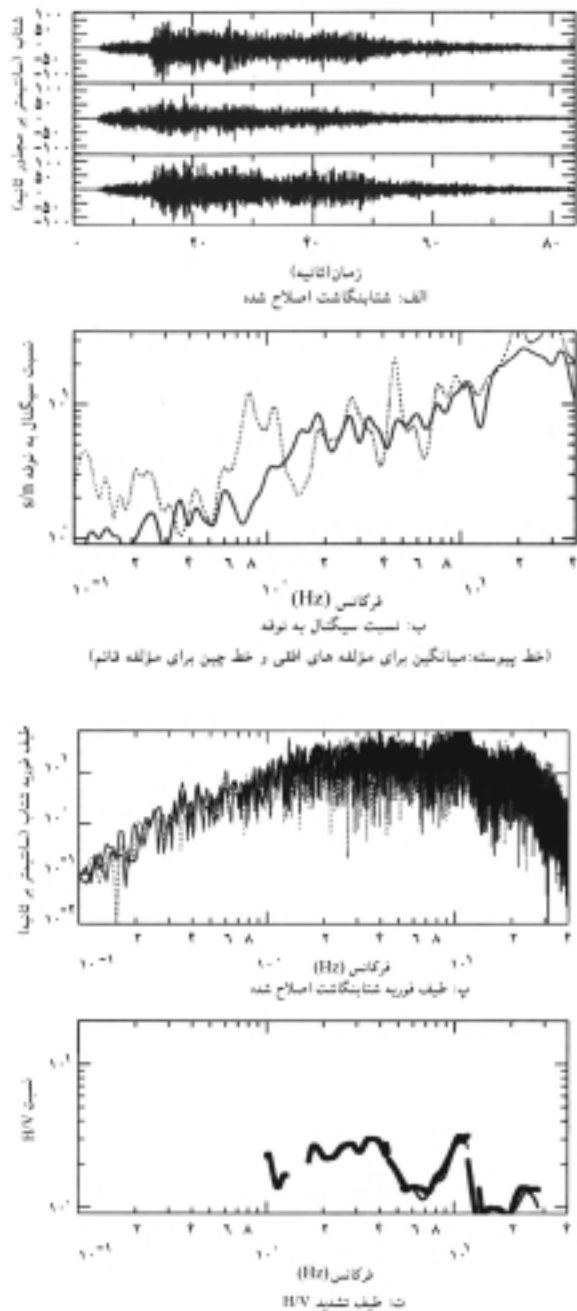
یادآوری می‌شود که در شکل‌های (۴-۱) و (۴-۲) و سایر برآوردهای کاهندگی، مقدارهای مشاهده شده بدون توجه به اثر ساختگاه بر روی نمودارها نمایش داده شده‌اند؛ چرا که در فاصله‌های دور مقدارهای برآورد شده بر اساس



شکل (۲-۵): شتابنگاشت ثبت شده در گناباد

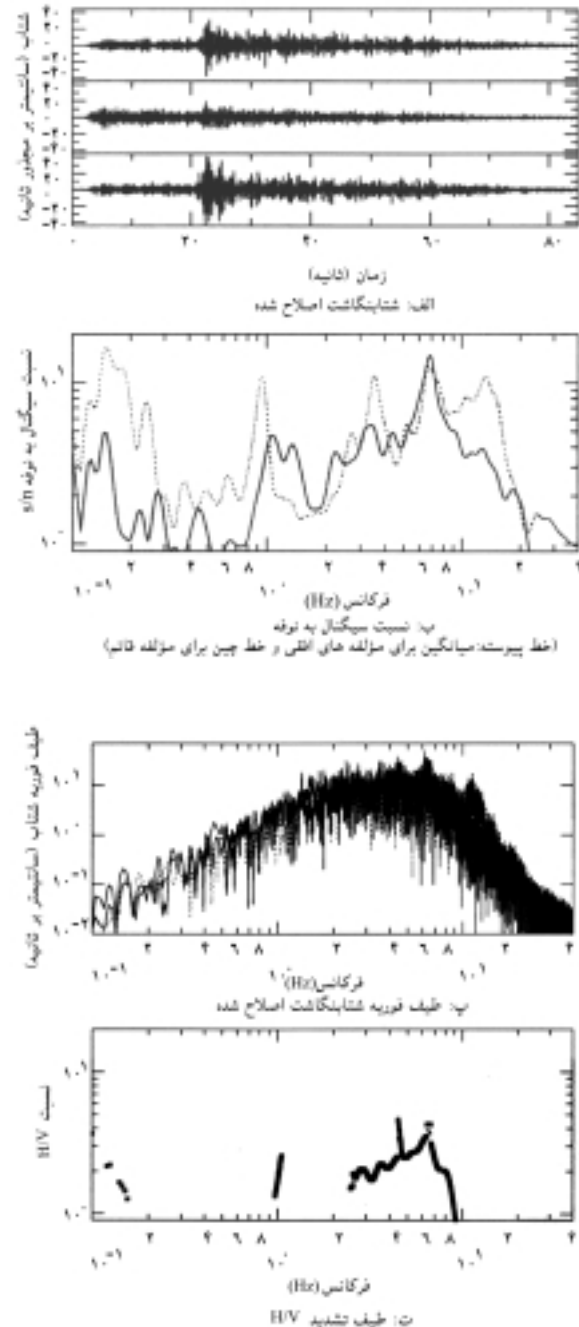


مدلهای ایران بر روی ساختگاههای مختلف تفاوت مهمی در مقدارهای بیشینه شتاب نشان نمی دهند؛ لذا، صرفاً داده های مشاهده شده با برآوردهای روی ساختگاه سنگی با مدل های مختلف مقایسه شده اند تا میزان پیروی کلی داده های از مدل ها بررسی گردد.

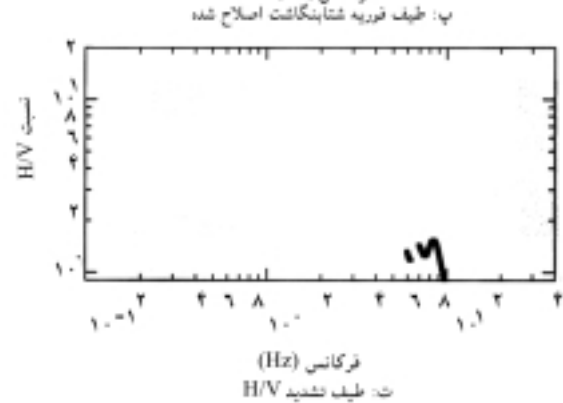
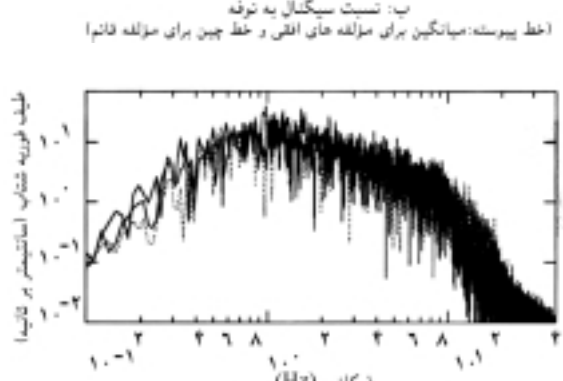
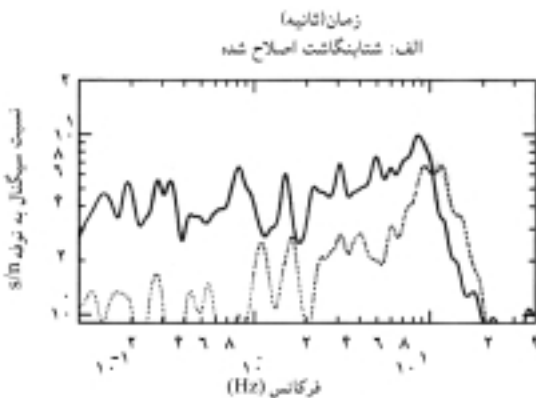
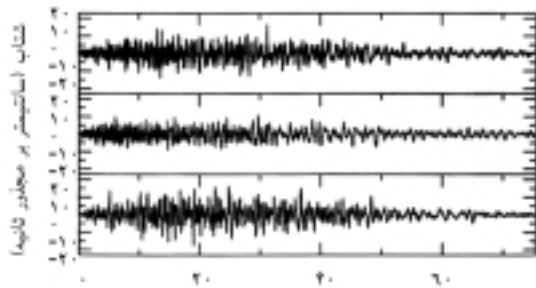


شکل (۲-۸): شتابنگاشت ثبت شده در سنگال

رابطه های کاهندگی جنبش نیرومند زمین (عمدتاً شتاب زلزله) در نواحی مختلف دنیا نیز ارائه شده اند. این رابطه هادر هر ناحیه با توجه به ویژگیهای لرزه زمین ساختی و زلزله شناختی پوسته زمین در آن ناحیه کاربرد دارند و استفاده از آنها در ایران حتی الامکان توصیه نمی شود. به هر حال هنگامی که از رابطه ای توسعه داده-

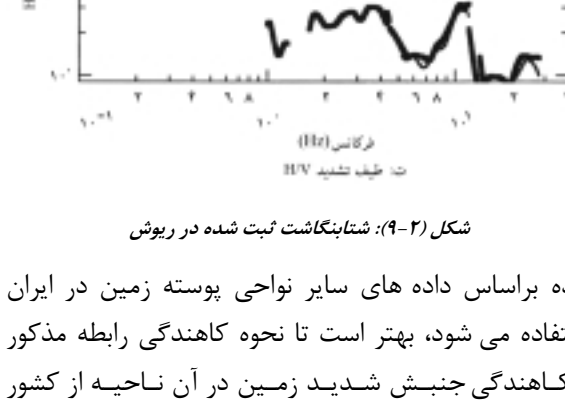
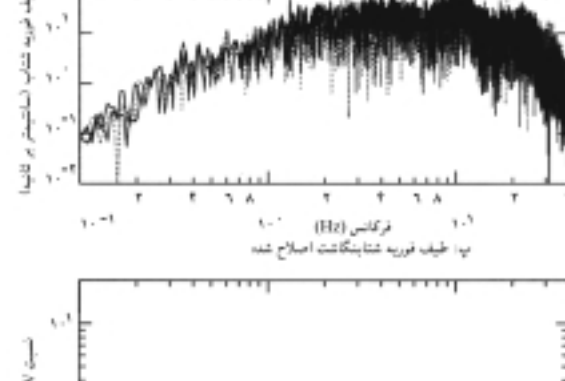
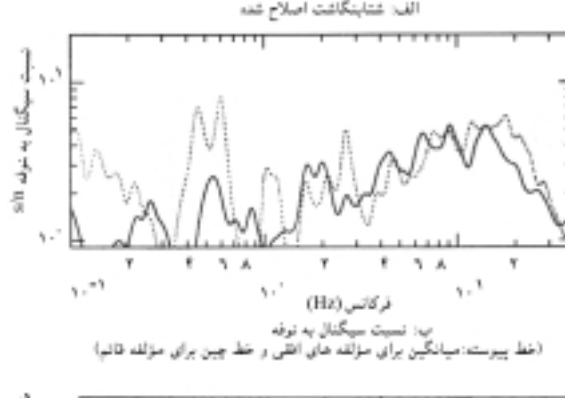
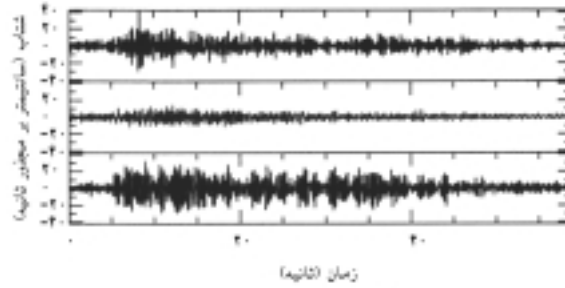


شکل (۲-۷): شتابنگاشت ثبت شده در سد شهید یعقوبی



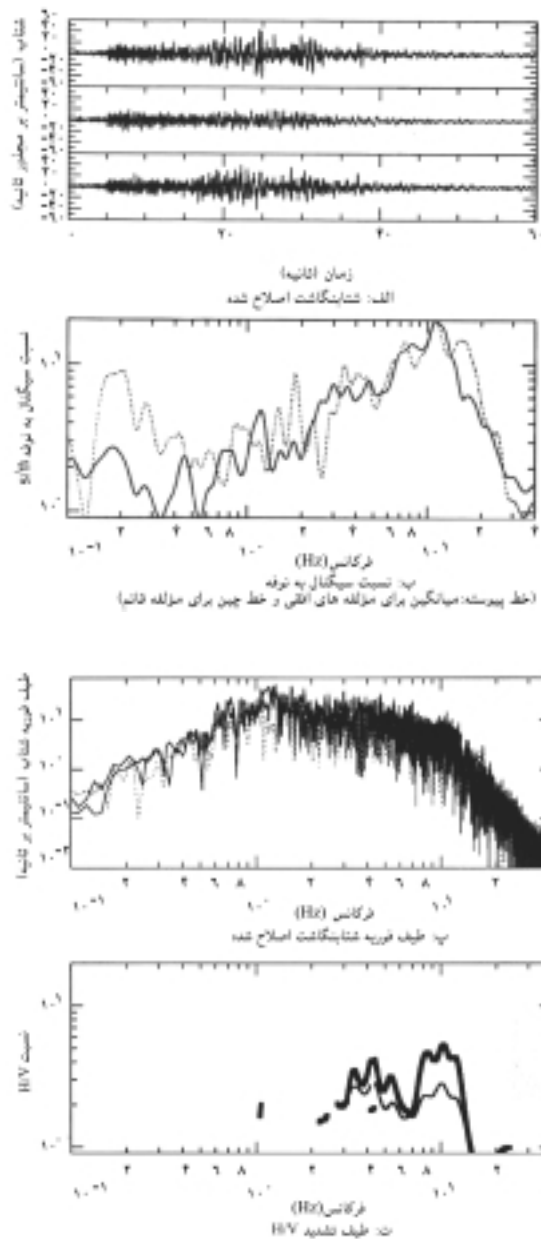
شکل (۲-۱۰): شتابنگاشت ثبت شده در موسویه

بالای طیف فوریه شتاب (کاپا) از مشخصات مهم جنبش نیرومند زمین در هر ناحیه می باشد، لازم است تا هنگام استفاده از مدل کاهندگی توسعه داده شده در نواحی



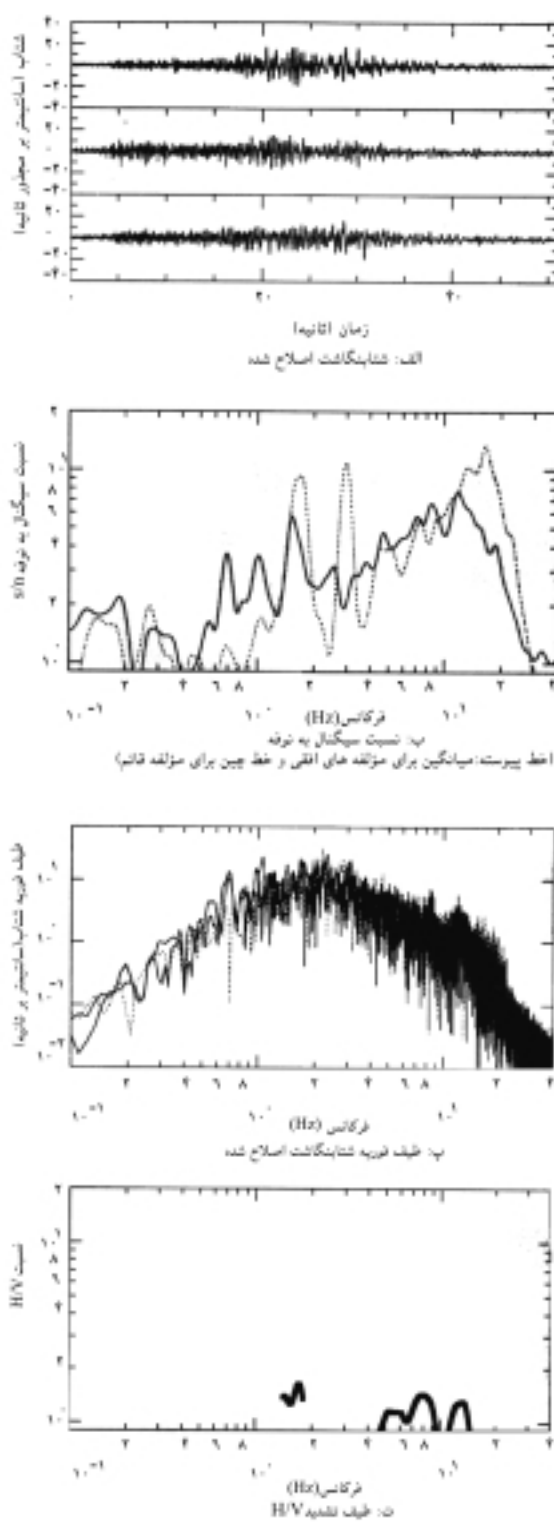
شکل (۲-۹): شتابنگاشت ثبت شده در ریوش

شده براساس داده های سایر نواحی پوسته زمین در ایران استفاده می شود، بهتر است تا نحوه کاهندگی رابطه مذکور با کاهندگی جنبش شدید زمین در آن ناحیه از کشور مقایسه شده و بهترین مدل (بیشترین انطباق با کاهندگی جنبش نیرومند زمین در ایران) انتخاب- شود. از آنجا که میزان افت تنش، دوام جنبش نیرومند زمین، محتوای فرکانسی جنبش، فاکتور  $Q$  و افت فرکانس



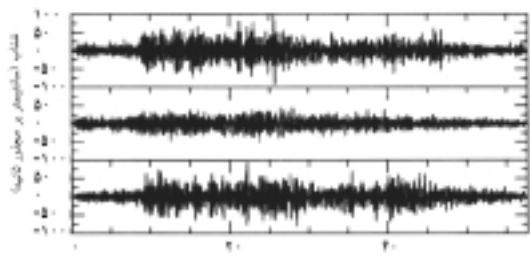
شکل (۲-۱۲): شتابنگاشت ثبت شده در مرکز

دقت شود. بدیهی است که به این منظور، محاسبه پارامترهای یاد شده در هر دو ناحیه و سپس مقایسه آنها برای جنبش‌های چند زمین لرزه نمونه و مهم الزامی می‌باشد. در مقاله حاضر مقایسه دو رابطه کاهندگی [۷] و [۸] که شباهتهای بیشتری با مدل کاهندگی ایران نشان می‌دهند، انتخاب شده و با داده‌های مشاهده شده و مدل کاهندگی البرز-ایران مرکزی [۴] مقایسه شده‌اند.



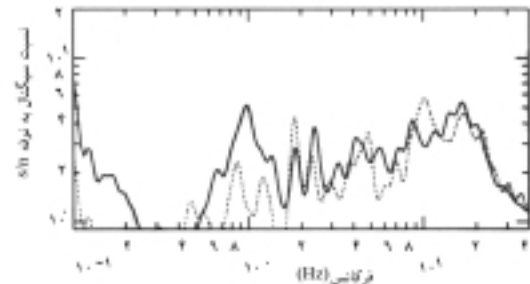
شکل (۲-۱۱): شتابنگاشت ثبت شده در مود

دیگر به شباهت یا نزدیکی پارامترهای یاد شده در جنبش‌های زمین در آن ناحیه با جنبش زمین در ناحیه مورد مطالعه ایران

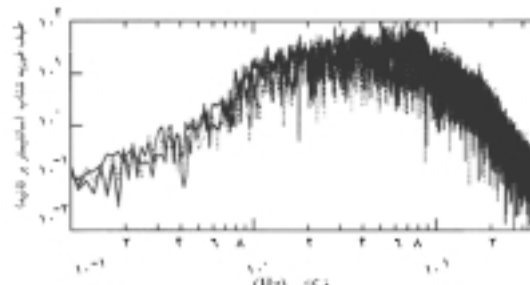


زمان (ثانیه)

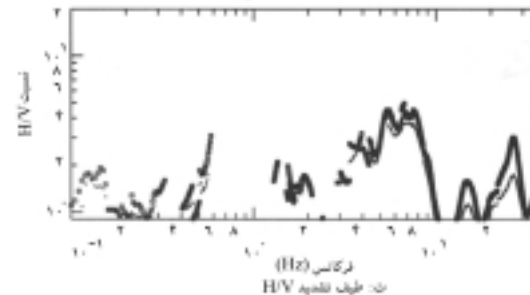
الف: شتابنگاشت اصلاح شده



خط پیوسته: میانگین برای مؤلفه های افقی و خط چین برای مؤلفه قائم  
نسبت سیگنال به نوفه



ب: خط نوری شتابنگاشت اصلاح شده  
فرکانس (Hz)



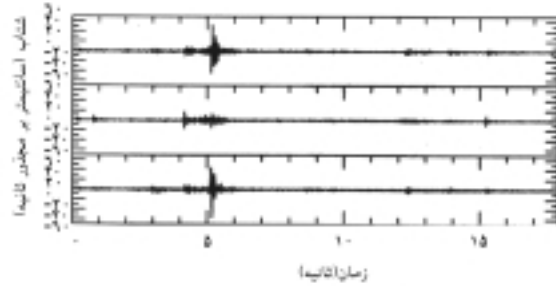
ت: خط نوری شتابنگاشت اصلاح شده  
فرکانس (Hz)

شکل (۲-۱۴): شتابنگاشت ثبت شده در خواب

باختر ایالات متحده رابطه (۸) را برای بیشینه شتاب افقی (برای بزرگ‌های بین ۵/۰ و ۷/۷) ارائه نمودند:

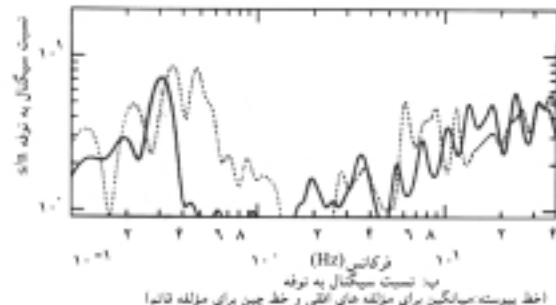
$$\log A = -1.02 + 0.244M - \log(r) - 0.00255(r) + 0.26(P) \quad (۸)$$

در رابطه (۸)،  $A$  بیشینه شتاب افقی (بر حسب  $g$ )،  $r$  فاصله کانونی تا چشمه لرزه زا و  $P$  پارامتر انحراف معیار است.

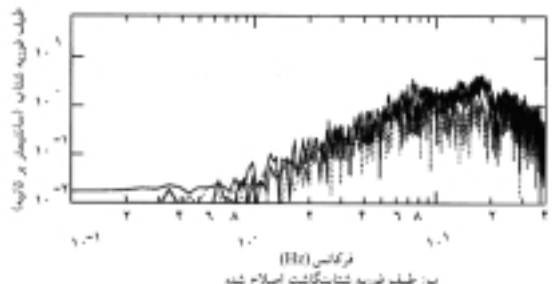


زمان (ثانیه)

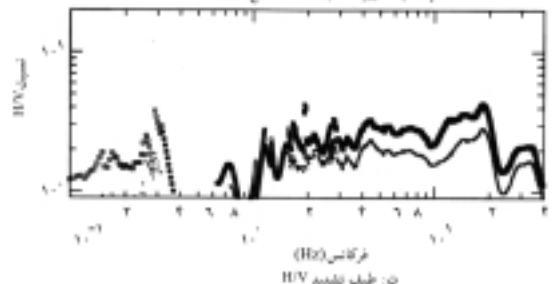
الف: شتابنگاشت اصلاح شده



خط پیوسته: میانگین برای مؤلفه های افقی و خط چین برای مؤلفه قائم  
نسبت سیگنال به نوفه



ب: خط نوری شتابنگاشت اصلاح شده  
فرکانس (Hz)



ت: خط نوری شتابنگاشت اصلاح شده  
فرکانس (Hz)

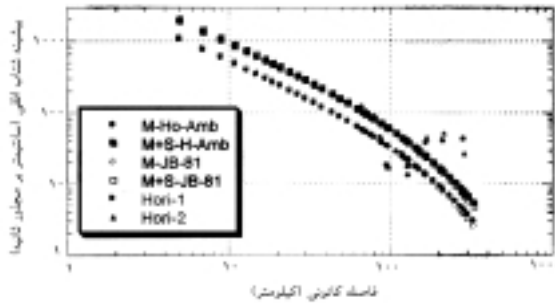
شکل (۲-۱۳): شتابنگاشت ثبت شده در حاجی آباد (پس لرزه)

آمبرسیز [۷] بر اساس پایگاه داده های زمین لرزه های اروپا به صورت زیر رابطه کاهندگی ارائه نمود:

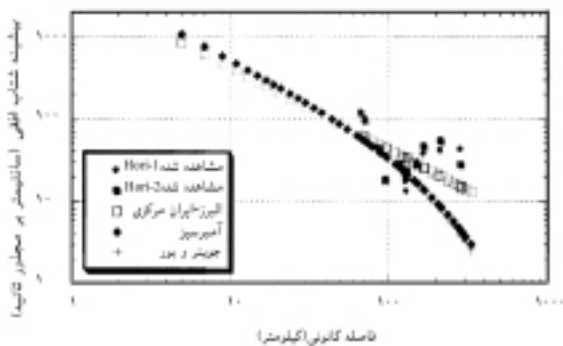
$$\log(PGA) = -0.789 + 0.2128(M_s) - \log(r) - 0.00255(r) + 0.25(P) \quad (۷)$$

در رابطه (۷)،  $PGA$  بیشینه شتاب زمین بر حسب  $g$ ،  $r$  فاصله کانونی تا چشمه به کیلومتر  $r^2 = R^2 + 7.2^2$  (کمترین فاصله تاگسل)،  $P$  پارامتر انحراف معیار ( $PGH, P=0$  برای مقدار میانگین با ۵۰٪ احتمال محاسبه می شود و  $P=1$  برای ۸۴/۱٪ انحراف معیار) می باشد. جویئر و بور [۸] نیز بر اساس بانک داده های

شکل (۳-۴) مقادیرهای میانگین و میانگین به علاوه، انحراف معیار بر اساس مدل‌های کاهندگی آمبرسیز و جویئر-بور با مقادیرهای مشاهده شده مقایسه شده است. در این شکل بویژه در فاصله‌های بیش از ۱۰۰ کیلومتر عدم انطباق مدل‌های یاد شده با مقادیرهای مشاهده شده در زلزله اردکول بیشتر می‌شود. از سوی دیگر، انطباق تقریباً کامل مدل‌های آمبرسیز و جویئر-بور جالب توجه است. در شکل (۴-۴) مقادیرهای

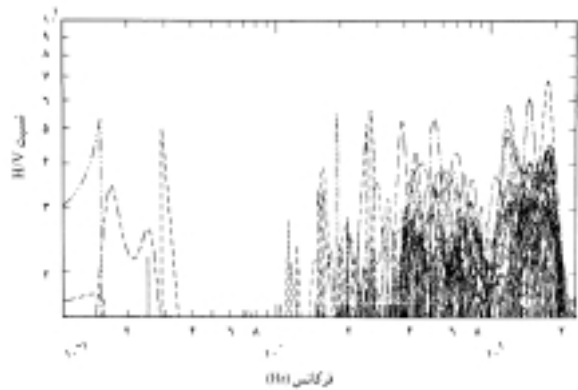


شکل (۳-۴): مدل‌های کاهندگی آمبرسیز (۱۹۹۵) و جویئر و بور (۱۹۸۲) (به ترتیب دایره برای مقادیرهای میانگین و میانگین به علاوه انحراف معیار، مربع توپر برای مدل آمبرسیز توخالی برای مدل جویئر و بور) برای بزرگای  $M_w = 7.2$  و در فاصله کانونی گوناگون به همراه مقادیرهای مشاهده شده برای مؤلفه های افقی جنبش در زلزله اردکول

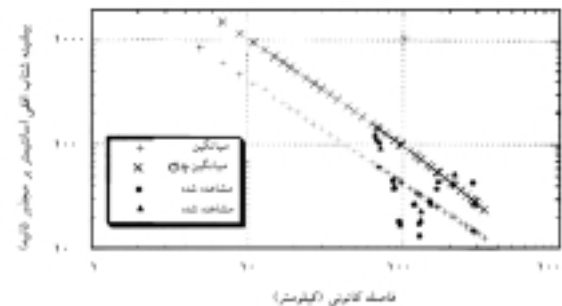


شکل (۴-۴): برآورد میانگین بیشینه شتاب افقی برای  $M_w = 7.2$  در فاصله های کانونی مختلف بر اساس مدل های کاهندگی البرز-ایران مرکزی (مربع توخالی)، آمبرسیز (لوزی توپر) و جویئر و بور (+) و مقادیرهای بیشینه شتاب افقی مشاهده شده در زمین لرزه ۱۳۷۶ اردکول (قائم)

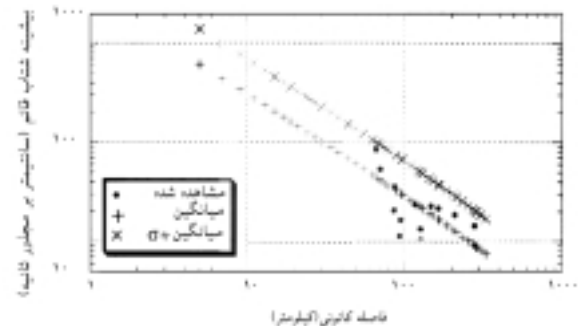
میانگین برای مدل‌های البرز-ایران مرکزی، آمبرسیز و جویئر-بور بزرگای برای  $M_w = 7.2$  و فاصله های کانونی مختلف به همراه مقادیرهای بیشینه شتاب افقی مشاهده شده در زلزله اردکول نشان داده شده است. در این شکل مشخص است که



شکل (۳): پایداری نسبت H/V برای ۳۹ نگاشت به دست آمده از پس لرزه های زلزله ۱۳۷۶ اردکول (قائم)، در ایستگاه حاجی آباد

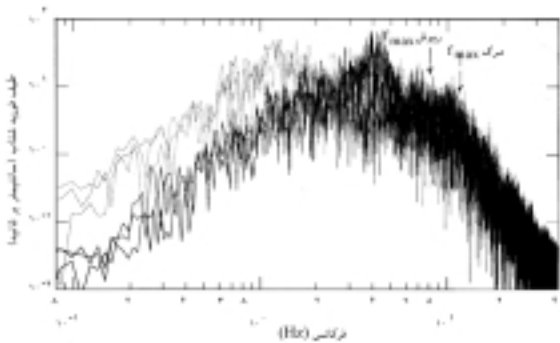


شکل (۱-۴): مقادیرهای میانگین (+) و میانگین به علاوه یک انحراف معیار (x) برای  $M_w = 7.2$  در فاصله های کانونی مختلف بر اساس برآورد با رابطه کاهندگی برای البرز-ایران مرکزی و مقایسه با مقادیرهای مشاهده شده در زمین لرزه اردکول-قائم (با علامتهای دایره و مثلث برای مقادیرهای هر یک از دو مؤلفه افقی)

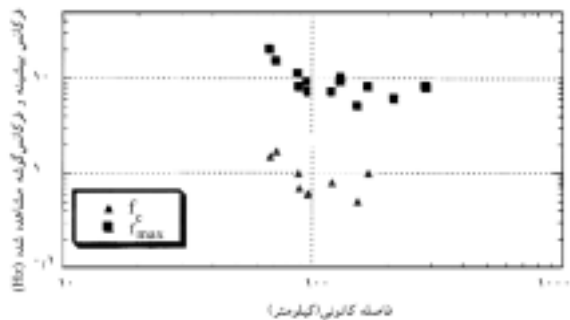


شکل (۲-۴): مقادیرهای میانگین (+) و میانگین به علاوه یک انحراف معیار (x) برای بزرگای  $M_w = 7.2$  در فاصله های کانونی مختلف بر اساس برآورد با رابطه کاهندگی البرز-ایران مرکزی و مقایسه با داده های مشاهده شده بیشینه شتاب قائم (با علامت دایره)

در این مطالعه، مدل‌های کاهندگی مذکور برای بزرگای  $M_w = 7.2$ ، فاصله های کانونی مختلف و بهره گیری از مقادیرهای مشاهده شده بیشینه شتاب افقی، مقایسه ای مطابق شکل‌های (۳-۴) و (۴-۴) صورت گرفته است. در



شکل (۴-۵): طیف فوریه شتاب برای مؤلفه های نگاشت در مرک (در فاصله کانونی ۸۸ کیلومتری) به صورت خط چین و مؤلفه های نگاشت در ریوش در فاصله ۲۸۶ کیلومتری (خط توپر). مقادیرهای  $f_{max}$  برای این دو ایستگاه نشان داده شده است.



شکل (۴-۶): تغییرات فرکانس گوشه و فرکانس بیشینه مشاهده شده در زلزله اردکول (قائن) با فاصله کانونی

را برآورد نمود.

اختلاف زمان رسید فازهای  $S$  و  $P$  نسبت به محاسبه فاصله کانونی ( $R_h$  به کیلومتر) با رابطه (۹) برآورد می شود:

$$R_h = 8 \times (t_s - t_p) \quad (9)$$

البته در هر مورد که کیفیت نگاشت نامناسب و یا نگاشت بدون پیش رویداد حاصل شده و زمان رسید فازهای  $S$  و  $P$  نامشخص بوده، این محاسبه صورت نگرفته است. از سوی دیگر، بر اساس مدل  $\omega$ -مربع [۹ و ۱۰]، گشتاور لرزه ای زمین لرزه را می توان با رابطه (۵) محاسبه نمود:

$$M_o = \frac{A_o}{2\pi f_c^2} \cdot \frac{4\pi R_h \cdot \rho \cdot \beta^3}{R' \theta \phi \cdot F_s} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)،  $M_o$  بر حسب نیوتن-متر،  $A_o$  سطح بخش صاف طیف فوریه شتاب چشمه (متر بر ثانیه)،  $\rho$  سختی ( $2/8 \times 10^3$  کیلوگرم بر متر مکعب)،  $\beta$  سرعت موج برشی در پوسته (با فرض ۳۰۰۰ متر بر ثانیه)،  $f_c$  فرکانس گوشه

مدل البرز-ایران مرکزی انطباق بیشتری با مقادیرهای مشاهده شده در زلزله اردکول نسبت به مدل های آمبرسیز و جویئر-بور دارد. تفاوت مدل های البرز-ایران مرکزی و مدل های توسعه داده شده برای اروپا و ایالات متحده بویژه در فاصله های بیش از ۱۰۰ کیلومتر بسیار واضح است.

بررسی کاهندگی جنبش با مشاهده تغییرات فرکانس بیشینه ( $f_{max}$ ) و فرکانس گوشه ( $f_c$ )، با افزایش فاصله کانونی همراه گردید. در شکل (۴-۵) طیف های فوریه شتاب برای نگاشت مرک (در فاصله کانونی ۸۸ کیلومتری) و نگاشت ریوش (در فاصله ۲۸۶ کیلومتری) نشان داده شده است. فرکانس بیشینه ( $f_{max}$ ) برای نگاشتی در فاصله کمتر تا کانون زلزله، مقدار  $f_{max}$  بیشتری نشان می دهد و با افزایش فاصله کانونی، مقدار  $f_{max}$  به حد کمتری منتقل می شود. یادآوری می شود که فرکانس گوشه ( $f_c$ ) مرز بین ناحیه بالا رونده و بخش صاف طیف فوریه شتاب و فرکانس بیشینه مرز بین حد صاف و بخش کاهنده (فرکانس بالای) این طیف است. مقادیرهای مشاهده شده  $f_{max}$  و  $f_c$  با فاصله کانونی در زلزله اردکول (قائن) در شکل (۴-۶) آمده است. در این شکل واضح است که با افزایش فاصله کانونی مقادیرهای  $f_{max}$  و  $f_c$  کاهش می یابد. این موضوع نشان می دهد که رابطه ای نظام مند در کاهندگی این پارامترها با فاصله کانونی وجود دارد، به نحوی که با افزایش فاصله از کانون کاهنده می شوند؛ لذا، پیشنهاد می شود تا توسعه چنین رابطه های کاهندگی به صورت تجربی برای داده های شتابنگاری (بویژه داده های ایران) بررسی گردد. اهمیت فرکانس گوشه بویژه از نظر برآورد گشتاور لرزه ای و بزرگای گشتاوری و از آنجا که رابطه عکس با نصف زمان گسیختگی در چشمه لرزه زا دارد ( $f_c = \frac{2}{T_R}$ ، زمان گسیختگی)، حائز اهمیت است؛ لذا، برآورد تجربی آن می تواند اطلاعات جالبی از چشمه لرزه ای جنبش زمین لرزه به دست دهد.

## ۶- برآورد بزرگای گشتاوری

برای جنبش های نیرومند زمین که کیفیت مناسبی داشته و نسبت سیگنال به نوفه در آنها بالا و رسید اولین موجهای  $P$  و  $S$  در آنها مشخص می باشد، می توان فاصله کانونی

بر حسب  $R\theta\phi, Hz$  شکل انتشار زوج دوگانه برای موجهای  $SH$  و  $SV$  (به طور متوسط حدود  $0/6$  در نظر گرفته می شود) و  $F_s$  ضریب تشدید سطح آزاد (برابر با ۲) می باشند. به این ترتیب، برای نگاشتهایی که  $f_c$  در آنها در فرکانس بالاتر از فیلتر گذر بالا قابل تشخیص بوده، مقدار فرکانس گوشه محاسبه و در جدول (۲) ارائه شده است. با بهره گیری از رابطه (۱۰) برای نگاشتهایی که فرکانس گوشه و فاصله کانونی در آنها قابل تشخیص بود، گشتاور لرزه ای ( $M_o$ ) محاسبه شده و با استفاده از رابطه کاناموری [۱۱] برای محاسبه  $M_w$  اقدام شده است:

$$M_w = 0.677 \times \log M_o - 6.0 \quad (11)$$

بر اساس برآوردهای صورت گرفته، مقدارهای فاصله کانونی، فرکانس گوشه، سطح صاف طیف فوریه شتاب ( $A_o$ )، مقدارهای بزرگای  $M_w$  بین  $7/1$  تا  $7/6$  در جدول (۲) ارائه شده است. مقدار متوسط  $M_w$ ، در حد  $7/3$  محاسبه شده، در حالی که مقدار گزارش شده از سوی  $NEIC$  در حد  $7/2$  بوده است.

## ۷- نتیجه گیری

بررسی داده های شتابنگاری زلزله اردکول- قائن نمایانگر وضعیت جنبش نیرومند زمین در این زلزله با بزرگای  $M_w = 7.2$  است. متأسفانه نگاشتهای از فاصله های کانونی نزدیک به دست نیامده است. در صورت وجود چنین نگاشتهای، بررسیهای تفصیلی بیشتری بویژه بر روی نگاشتهای حوزه نزدیک قابل انتظار بود؛ ولی با داده های موجود پس از پردازش اعمال شده در این مطالعه می توان نتیجه گیریهای زیر را عنوان نمود:

- بزرگترین مقدار بیشینه شتاب افقی ( $HPGA$ ) در فاصله کانونی  $68$  کیلومتری به میزان  $118$  سانتیمتر بر مجذور ثانیه در ایستگاه سنگان به دست آمده است. بیشینه شتاب قائم ( $VPGA$ ) نیز مربوط به همین ایستگاه است و مقدار آن  $82$  سانتیمتر بر مجذور ثانیه است.

- بر اساس برآورد نسبت  $H/V$  ساختگاههای شتابنگاری بیرجند، بسک آباد، سد شهید یعقوبی، سنگال، موسویه، مود و حاجی آباد از نوع یک (سنگی)، ساختگاههای دشت بیاض و خواف از نوع دو (آبرفت سخت)،

ساختگاههای ریوش و مرک از نوع سه (خاک غیرچسبنده ژرف) و ساختگاههای فیض آباد، گناباد و تربت حیدریه نیز از نوع چهار (خاک نرم) می باشند. بیشترین نگاشتهای در محللهای حاجی آباد (پس لرزه ها)، با  $39$  نگاشت، خواف و ریوش با هفت نگاشت و گناباد و بیرجند، به ترتیب با پنج و چهار نگاشت به دست آمده است.

- کاهندگی جنبش نیرومند زمین مشاهده شده در زلزله اردکول (قائن) مربوط به مؤلفه های افقی و قائم، با مدل کاهندگی در البرز- ایران مرکزی انطباق جالبی نشان می دهد.

- کاهندگی جنبش مشاهده شده در زلزله اردکول (قائن) تا فاصله حدود  $100$  کیلومتر کم و بیش با مدللهای کاهندگی آمبرسیز [۷] برای اروپا و جوینر- بور [۸] برای ایالات متحده انطباق دارد.

- مقدارهای  $f_c$  و  $f_{max}$  مشاهده شده با افزایش فاصله کانونی در این زلزله کاهنده شده اند. به نظر می رسد که چنین رابطه ای قابل توسعه به صورت تجربی می باشد.

- توزیع کاهندگی بیشینه شتاب و توجه به ایستگاههایی که در سوی شمال باختری کانون زلزله (و گسل زمین لرزه ای) واقع بوده اند، نشان می دهد که جنبش در راستای گسل (به سوی شمال باختری) تا فاصله های دورتر، دیرتر کاهنده شده است (به نسبت راستای عمود بر گسل). چنین حالتی در جنوب خاوری گسل به دلیل عدم وجود ایستگاه شتابنگاری در افغانستان و کیفیت بد نگاشت حاصله در محمدآباد زابل قابل بررسی نمی باشد.

- با توجه به اینکه نگاشتهای در فاصله نزدیک کانون زلزله به دست نیامده است، نمی توان اثرهای حوزه نزدیک را بررسی نمود. از این جهت بررسی احتمال وجود اثرهایی مثل جهت پذیری امکان پذیر نبوده است. مدل کردن جنبش مصنوعی بر اساس پس لرزه های ثبت شده در حاجی آباد و نگاشتهای موجود از لرزه اصلی در فاصله های مختلف امکان پذیر می باشد.

- مقدارهای بزرگای  $M_w$  بر اساس داده های جنبش نیرومند زمین  $7/3$  برآورد شد که با مقدار برآورد شده دور لرزه ای آن (بزرگای  $M_w = 7.2$ ) نزدیک است. مقدار بزرگا

## ۹- مراجع

1. Web Page of Seismology Dept. of Harvard University (1997), www.harvard-seismology.edu.
2. Zare, M. (1997), The Recent (1997) Great Earthquakes in Iran: An Introduction, Proc. of 8th Int. Conf. On Soil Dyn. and Earthquake Eng. (SDEE 97), Vol. of Extended Abstracts, pp. 328-329.
- ۳- زارع، مهدی، بررسی و پردازش داده‌های شتابنگاری زمین لرزه دهم اسفند ۱۳۷۵ گلستان اردبیل ( $M_w = 6.0$ )، پژوهشنامه زلزله شناسی و مهندسی زلزله، سال چهارم، شماره اول، بهار ۸۰، صص ۱۹-۳۳، ۱۳۸۰.
4. Zare, M. (1999), Contribution a l'etudes des Mouvements Forts en Iran: du Catalogue aux lois d'attenuatins, Ph.D Thesis (These de Doctrat), 237 p., Universite Joseph-Fourier, France.
5. Konno, K., and Ohmachi, T. (1998), "Ground Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio Between Horizontal and Vertical Components of Microtermors", Bull. of Seis. Soc. of America (BSSA), Vol. 88, No. 1, pp. 228-241.
6. Zare, M., Bard, P.Y., Ghafory-Ashtiany, M. (1999), "Site Characterizations for the Iranian Strong Motion Network" Journal of Soil Dynamics and Earthquake Eng. (SDEE), Vol. 18, No. 2, pp. 101-123.
7. Ambraseys A.A. (1995), The Prediction of Earthquake Peak Ground Acceleration in Europe, Eq. Eng. & Structural Dyn., Vol. 24, pp. 467-490.
8. Joyner, W. and Boore, D.M. (1981), Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong Motion Records From the 1979 Imperial Valley, California Earthquake, Bull. Seis. Soc. America (BSSA), Vol. 71, No. 6, pp. 2011-2038.
9. Brune, J. N. (1970), "Tectonic Stresses and the Spectra of Seismic Shear Waves", J. Geoph. Res., Vol. 75, pp. 4997-5009.
10. Hanks, T.C. (1979), "b Value and  $\omega^2$  Seismic Source Models: Implications for Tectonic Stress Variations Along Active Crustal Fault Zones", J. Geoph. Res., Vol. 84, pp. 2235-2242.
11. Kanamori, H. (1977), "The Energy Release in Great Earthquakes", J. Geoph. Res., Vol. 82, pp. 2981-2987. ◀

برای شتابنگاشت موجود از اولین پس لرزه این زلزله در حاجی آباد (ثبت شده در روز رخداد لرزه اصلی)  $M_w = 4.8$  برآورد شده است.

بر اساس مطالعه صورت گرفته و نتیجه های ارائه شده پیشنهادهای زیر برای بررسیهای بعدی ارائه می گردد:

- از آنجا که چنین زلزله‌هایی ( $M > 7$ ) با فاصله‌های زمانی زیاد رخ می دهند، پیشنهاد می شود تا حتی الامکان در نصب و حفاظت از دستگاههای شتابنگاری بیشترین دقت اعمال شود تا در حوزه نزدیک، اطلاعات شتابنگاری با ارزشی نظیر آنچه که ممکن بود در حاجی آباد (زیرکوه قائن) به دست آید، از دست نرود.

- بررسیهای کاهندگی در ایران را می توان بر اساس سایر پارامترهای جنبش نیرومند زمین (نظیر  $f_c$  و  $f_{max}$ ) پی گرفت. رابطه های تجربی که به این ترتیب حاصل می شوند، برای استنباط سایر پارامترهای مربوط به چشمه لرزه زا اهمیت فوق العاده ای دارد.

- توصیه می شود بررسیهای اثرهای ساختگاه بویژه در محلهایی که بیشترین داده های شتابنگاری حاصل شده- است بر اساس بررسیهای برآورد سرعت موج برشی و حفاری تکمیل گردد.

- برای این زلزله توصیه می شود تا با استفاده از نگاشتهای پس لرزه های حاصله در حاجی آباد و نگاشتهای لرزه اصلی (که در فاصله های کانونی بیش از ۶۸ کیلومتر به دست آمده اند)، شتابنگاشت مصنوعی (آنچه که در محل ایستگاه حاجی آباد در هنگام لرزه اصلی قابل مشاهده بوده است) توسعه یابد.

## ۸- سپاسگزاری

داده های شتابنگاری مورد استفاده در این مطالعه از سوی مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن در اختیار پژوهشگاه قرار گرفته است که از این مرکز سپاسگزاری می شود. همچنین از آقای مهندس حسین میرزایی علویجه به دلیل نظریات مفید در مورد محل ثبت داده های شتابنگاری قدردانی می گردد.